

Аналіз взаємодії конфігуративного каменя із водним потоком**В. Б. Струтинський, О. М. Яхно, О. С. Мачуга, І. Р. Гнатів, Р. М. Гнатів**

Ерозія та руйнування русел річок, фундаментів підтоплюваних інженерних споруд пришивидишується під час стихійних явищ, супроводжуваних значним збільшенням швидкості й змоченого периметру річкових потоків, набуттям рухливості частинками русла. Проаналізовано взаємодію потоку води із окремим каменем циліндричної, сферичної, еліпсоїдної, пірамідальної та іншої конфігурації. Зокрема розвинуто традиційний підхід до визначення силової дії рідини на тверду перешкоду – камінь - для випадку стиснення струменю води й врахування відносної обтічності каменю із заданими геометричними характеристиками: діаметр, об'єм та конфігурація.

Запропоновано використовувати наступні параметри взаємодії потоку води із каменями різних конфігурацій: коефіцієнт стиснення та коефіцієнт обтічності. Отримано аналітичні залежності між граничною швидкістю потоку, яка спричиняє рух каменя, його масою та конфігурацією. Для сферичних гладких каменів ці відношення співпадають із класичними результатами. Запроваджені коефіцієнти типізовано у залежності від конфігурації окремого каменя у таблицях та графіках, що є зручним для використання у розрахунках берегоукріплень. Запропоновано використовувати коефіцієнт форми каменя – відношення дійсної граничної швидкості потоку, що викликає рухливості каменю довільної конфігурації із врахуванням його обтічності – до граничної швидкості потоку сферичного каменю такої ж маси з приведеним діаметром. Коефіцієнт форми слід використовувати як коригуючий множник у розрахунках мінімальної маси каменів для берегоукріплень та у гідротехнічних роботах. Для каменів клиновидної форми значення коригуючого коефіцієнта може в окремих випадках досягати значення 0,170, що вказує на високу ефективність використання таких каменів у порівнянні із сферичними. Крім того запропонований коефіцієнт може застосовуватися для уточнення граничної швидкості потоку води, з огляду на втрату стійкості існуючого берегоукріплення.

Визначено напрями подальших досліджень: аналіз ударної взаємодії конфігуративних каменів із елементами берегоукріплень; визначення параметрів руху водно- каменевого потоку

Ключові слова: річкові потоки, конфігурація каменю, дія потоку на перешкоду, гранична швидкість потоку, берегоукріплення

1. Вступ

Серед численних екологічних проблем сьогодення – процес розмивання берегів річковими потоками під час повеней та паводків. Особливо гостро ця проблема стосується гірських місцевостей, де під час стихійних явищ витрата

води в потоках збільшується в десятки, а часом – сотні разів. Унаслідок деструкції русла річки формуються водно – каменеві маси, що рухаються зі значною швидкістю й викликають подальше пришвидшення руйнування берегової лінії. Розміри каменів, які захоплюються водним потоком, певним чином пов’язані із швидкістю його руху. Тому міцність та опірність руйнуванню берегових укріплень повинні бути достатніми для взаємодії не тільки з потоком води, але і з водно-каменевою масою із урахуванням дискретного характеру навантаження, яке є функцією швидкості потоку та геоморфологічних умов русла.

Тому ретельне вивчення процесу взаємодії водного потоку із твердими перешкодами і включеннями відноситься до актуальних задач, які виникають в практиці спорудження та ефективної експлуатації різноманітних річкових берегоукріпних споруд. Традиційні підходи до вирішення таких задач базуються на використанні класичної формули Ізбаша, яка пов’язує об’єм та густину каменя із граничною швидкістю річкового потоку, який може зрушити з місця такий камінь. Однак локальні збурення, викликані стисливістю водного потоку, а також конфігурація каменя, цією формулою не враховується. З огляду на значні матеріальні збитки, які можуть виникати під час руйнування гідротехнічних споруд, уточнення результатів розрахунку конструкції таких об’єктів є вкрай важливими. Зокрема це стосується врахування під час таких розрахунків структурно-реологічних особливостей каменів та водного потоку, вказаних вище.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми даної роботи

В сучасній практиці одним із головних способів зменшення наслідків катастрофічних повеней та паводків на довкілля є захист берегової лінії і фундаментів інженерних споруд насипами – банкетами з каменів достатньо великого розміру, нечутливими до дії водного потоку. В роботі [1] типізовано конструкції банкетів у залежності від характеристик водного потоку, однак конфігурація каменів із банкету не враховується. Дослідження процесу локальних розмивів, викладене в роботі [2], лише частково враховує місцеві збурення водного потоку, не враховуючи його здатність до стисливості та імпульсну дію водно-каменевого потоку, в якому розмір рухомого каменя може бути близьким до розміру елементу насипу.

Задача взаємодії річкового потоку із твердим тілом – каменем виникла під час проектування та будівництва масштабних гідроспоруд шляхом влаштування кам’яних накидів, як це охарактеризовано в роботі [3], однак простота поданих в цій роботі інженерних оцінок не охоплює особливості матеріалу покриття русла, пов’язані із їх конфігурацією. Поряд із цим застосування числових методів розрахунку поведінки донних елементів, запропоноване у роботі [4], хоч і дозволяє враховувати структурні особливості об’єкту дослідження, однак ускладнює застосування в інженерній практиці. В роботі [5] камені моделюються сферами приведеного діаметру, а в роботі [6] – циліндрами. Однак отримані в цих роботах результати стосуються обмеженого класу об’єктів та не дозволяють аналізувати поведінку донних елементів різних конфігурацій. Результати, викладені в роботі [7], детально описують взаємодію каменів із потоком води, внаслідок чого утворюються вихори різної природи. Однак ці результати

також далекі від інженерної практики. Особливості моделювання контактної взаємодії каменю з рідинним середовищем представлено в роботі [8], проте такий підхід утруднений для аналізу каменів з різними фізико-механічними властивостями. В той же час урахування згаданих властивостей, представлене в роботі [9], не охоплює умов контактної взаємодії різних середовищ. Використання результатів обох робіт ускладнене для інженерного використання. В роботі [10] виявлено теоретичну граничну глибину розмиву в околі мостових опор, однак не проаналізовано мінімальний розмір укріпного каменю, достатній для захисту такої опори від впливу повеней та паводків.

Важливим для аналізу взаємодії річкового потоку із русловими елементами гідроспоруд є вивчення умов довготривалої успішної експлуатації таких об'єктів. В роботі [11] систематизовано характеристики успішних та довготривало експлуатованих гідроспоруд малих гідроелектростанцій окремих річкових басейнів Польщі, в роботі [12] систематизовано результати дослідження деформації тіла греблі внаслідок взаємодії із річковим потоком у деяких гідроспорудах Словаччини, а у роботі [13] обґрунтовано критерій довготривалої успішної експлуатації таких гідроспоруд. Однак ці результати не дозволяють охарактеризувати залежність довготривалості греблі від конфігурації каменів, із яких ці греблі сформовано.

Підсумовуючи наведений вище аналіз відзначимо, що важливі для практики проектування нових, високонадійних гідроспоруд та для захисту наявних гідроспоруд від природних явищ, наявні інженерні методи розрахунку розмірів елементів захисних каменевих насипів є недосконалими, оскільки вони не враховують конфігурацію каменів та стисливість водного потоку. Числові методи розрахунку таких задач потребують значних ресурсів стосовно моделювання об'єкту та розроблення складного програмного забезпечення. Тому важливим є будівництво удосконалених інженерних оцінок впливу конфігурації окремих каменів на граничну швидкість річкового потоку, який матиме здатність зрушувати окремі камені з місця. Важливість такого завдання пов'язується із необхідністю всебічного уточнення розмірів та конфігурації каменів, придатних для захисних насипів гідротехнічних споруд, які здатні забезпечити довготривале успішне їх функціонування у період прогнозованого збільшення швидкості річкового потоку під час природних явищ.

3. Мета та задачі досліджень

Мета роботи — визначення впливу конфігурації каменя на граничну швидкість потоку річки з огляду стійкості берегоукріплення.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити граничну рівновагу конфігуративного донного елементу — каменю у водному потоці на основі циліндричного донного елемента в річковому потоці;
- розробити методик у уточненого розрахунку елементів берегоукріплень річок із врахуванням конфігурації використовуваних каменів.

4. Матеріали та методи досліджень контактної взаємодії твердого тіла із рідиною.

Візуальний аналіз кам'яних наносів, що залишаються на дні русел гірських річкових потоків (рис. 1) дозволяє визначити окремі види конфігурації каменів

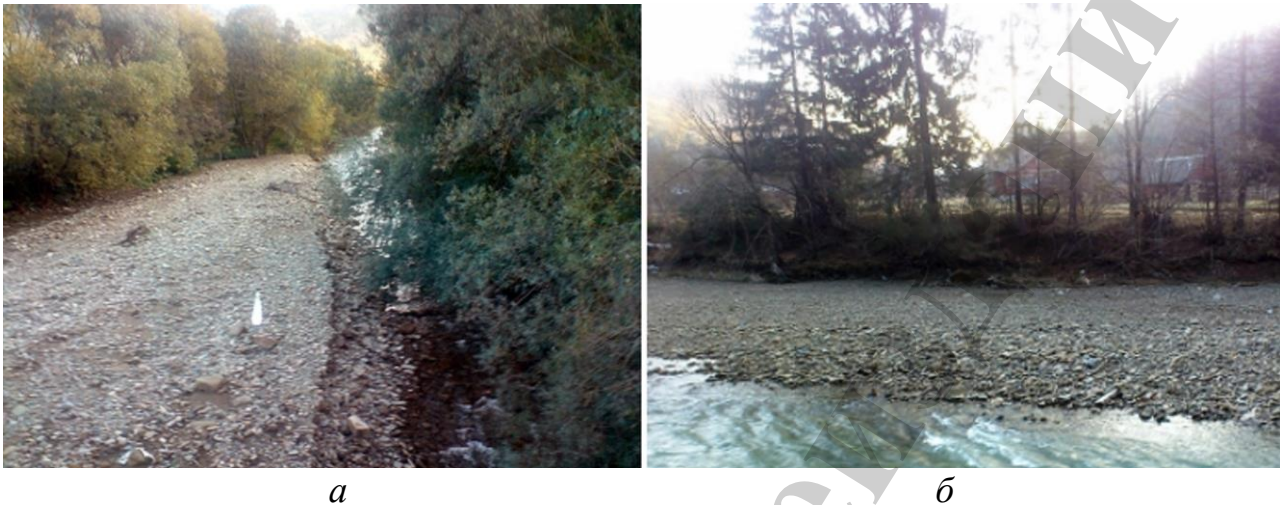


Рис. 1. Кам'яні наноси в руслах річок: *а* – річка Крушельниця, притока річки Стрий (2008 р.); *б* – річка Опір поблизу селища Тухля (2015 р.)

(донних елементів), які можна умовно типізувати наступним чином: циліндричні, сферичні, еліпсоїдальні, паралелепіпедальні, клиновидні, пірамідальні тощо.

Розглянемо циліндричний донний елемент, довжина якого – b – достатньо велика у порівнянні із радіусом r , тому впливом збурень річкового потоку в околі торців циліндра нехтуємо. Глибина занурення каменю є значно більша від його радіуса r (рис. 2, *а*).

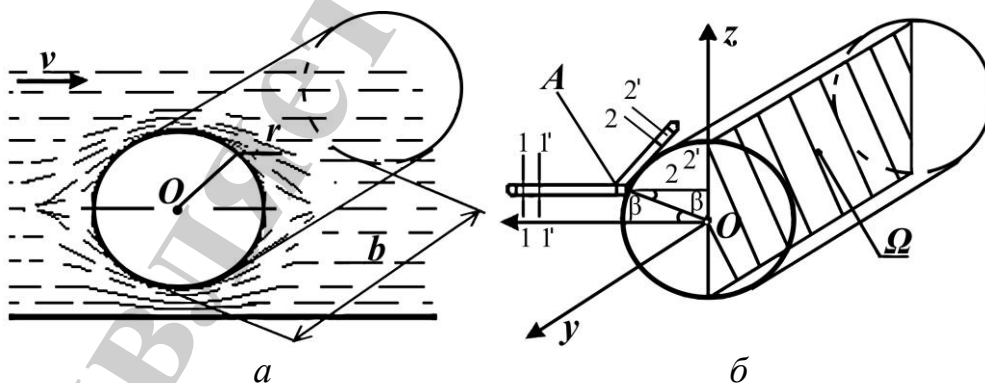


Рис. 2. Загальний вигляд каменю: *а* – в потоці; *б* – взаємодія довільної елементарної струминки з циліндричним каменем

Вважатимемо, що донний елемент – камінь є гладким, а вода в річці – малов'язка, тому процесами вихроутворення та в'язкісним тертям нехтуємо. Запровадимо декартову систему координат O_{xyz} так, що вісь Ox паралельна до

площини дна потоку та направлена проти руху потоку води, вісь Oz – перпендикулярна до неї, вісь Oy є направлена вздовж осі циліндра, точка O співпадає з центром ваги розглядуваного перерізу циліндра. Застосовуючи стандартний підхід, розглянемо елементарну струминку, що рухається зі швидкістю v відносно циліндричного каменю, точка перетину осі струминки із каменем – A – визначає радіус перерізу циліндра, нахилений до Ox під кутом β (рис. 2, б). Контактуючи із каменем струминка певним чином стискається та огинає його. Порція рідини в струминці, що знаходиться між перерізами 1–1 та 2–2, за час Δt переміститься в положення 1'–1' – 2'–2' та передасть каменю певну кількість руху, проекція якої на вісь Ox – $\Delta K P_{11'}$.

$$\Delta K P_{11'} = \int_{1'}^{2'} v_x dm - \int_1^2 v_x dm = \int_2^{2'} v_x dm - \int_1^{1'} v_x dm, \quad (1)$$

де v_x – проекція швидкості v на вісь Ox , dm – дискретний елемент маси вздовж розглядуваної елементарної струминки. На ділянці 1–1' проекція $v_x = -v_1$, а на ділянці 2–2' – $v_x = -v_2 \sin \beta$, де $v_1 = v$ – швидкість струминки до співудару із каменем, v_2 – після співудару. Внаслідок контактної взаємодії струминка стискається. Запроваджуємо величину $\varepsilon = \varepsilon(\beta) = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ – ступінь стиснення струминки, де ω_1 , ω_2 – площа поперечного перерізу струминки до та після співудару відповідно. З рівняння нерозривності потоку рідини слідує: $v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon(\beta)}$, тому на ділянці 2–2':

$$v_x = -\frac{v_1}{\varepsilon(\beta)} \sin \alpha.$$

Отже в (1) величина проекції швидкості v_x є незмінною на ділянках інтегрування.

Для елемента dm , враховуючи нерозривність потоку: $\omega_2 v_2 = \omega_1 v$, та напрям осі Ox

$$\int_1^{1'} dm = \rho \int_1^{1'} dV = \rho \omega_1 \int_1^{1'} dx = \rho \omega_1 (x'_1 - x_1) = \rho \omega_1 \frac{x'_1 - x_1}{\Delta t} \Delta t = -\rho \omega_1 v \Delta t,$$

$$\begin{aligned} \int_2^{2'} dm &= \rho \int_2^{2'} dV = \rho \omega_2 \int_2^{2'} dx = \rho \omega_2 (\xi'_2 - \xi_2) = \\ &= \rho \omega_2 \frac{\xi'_2 - \xi_2}{\Delta t} \Delta t = -\rho \omega_2 v_2 \Delta t = -\rho \omega_1 v \Delta t, \end{aligned}$$

де dV – відповідний dm елемент об'єму, ρ – густина води, x'_1, x_1 – координати перерізів 1–1 та 1'–1' вздовж осі Ox , ξ'_2, ξ_2 – біжучі координати перерізів 2–2 та 2'–2' вздовж осі, протилежної до напрямку руху струминки після її співудару із каменем. Підсумовуючи, запишемо

$$\Delta KP_{11'} = \rho v^2 \omega_1 \left(1 - \frac{\sin \beta}{\varepsilon(\beta)} \right) \Delta t. \quad (2)$$

Для визначення зміни за час Δt кількості руху $KP_{\Delta t}$ усіх елементарних струминок, які формують потік рідини, що фронтально взаємодіє із донним елементом, інтегруємо вираз (2) по площадці Ω – перерізу каменю координатною площиною yOz (рис. 2, б)

$$KP_{\Delta t} = \int_{\Omega} dKP = \rho v^2 \Delta t \int_{\Omega} \left(1 - \frac{\sin \beta}{\varepsilon(\beta)} \right) d\omega = \frac{1}{3} S_{\Omega} \rho v^2 \Delta t \cdot k_{CT}. \quad (3)$$

де $S_{\Omega} = 2br$ – площа площадки Ω , k_{CT} – інтегральний коефіцієнт стиснення потоку, для визначення якого необхідно задати функцію $\varepsilon = \varepsilon(\beta)$, що потребує значної кількості експериментальних даних. В даному викладі пропонується прийняти:

$$\varepsilon(\beta) = \varepsilon = \text{const} = \frac{S_B - S_{\Omega}}{S_B},$$

де S_B – площа витіснення, тобто площа частини поперечного перерізу потоку, в якому спостерігається збурення, викликане розглядуваним каменем. Тоді для циліндричного каменя

$$k_{CT} = 3 - \frac{1,5}{\varepsilon}. \quad (4)$$

Згідно теореми про зміну кількості руху тіла, застосованої до скінченного відтинку потоку рідини, сила дії рідини на камінь

$$F = \frac{KP_{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{1}{3} S_{\Omega} \rho v^2 k_{CT}. \quad (5)$$

Її величина є визначальною для дослідження граничної рівноваги каменя в потоці реальної рідини.

Під час проведення досліджень вважали, що донний елемент – камінь є гладким, а вода в ріці – малов'язка, тому процесами вихроутворення та в'язкісним тертям нехтували. Мінімальний розмір каменю традиційно визначали із класичного розв'язку задачі для сферичного донного елемента

приведеного діаметру в річковому потоці.

Для узагальнення випадку граничної рівноваги каменів, реальні камені замінювалися на сферичні донні елементи приведенного діаметра, що унеможливило визначення впливу конфігурації каменя на його взаємодію із водним потоком.

5. Результати досліджень про граничну рівновагу каменя в потоці рідини

Для вирішення першого із поставлених у роботі завдань розглядається циліндричний камінь в потоці рідини, яка рухається уздовж негоризонтальної площини з ухилом α (рис. 3). Використовуючи (5), отримуємо наступне відношення для граничної швидкості річкового потоку, яка викликає зрушення розглядуваного каменя з місця

$$v = Y_C \frac{1}{\sqrt{k_{CT}}} \sqrt{2g \frac{\rho_K - \rho_B}{\rho_B}} \sqrt{\frac{3V_T}{2S_\Omega}}, \quad (6)$$

де $Y_C = \sqrt{f \cos \alpha - \sin \alpha}$ – коефіцієнт стійкості каменю на зсув (скочення), f – узагальнений коефіцієнт опору, ρ_K, ρ_B – густина каменя та води відповідно, V_T – об'єм каменя.

За використання застосованого вище стандартного підходу отримано співвідношення для каменів різної конфігурації. Зазначимо, що формули (5) та (6) є універсальними для усіх випадків, форма каменя визначає коефіцієнт стиснення потоку k_{CT} . Запровадимо узагальнений коефіцієнт обтічності для каменя з максимальним розміром в напрямку руху потоку – D

$$Y_{OBT} = \frac{1}{\sqrt{k_{CT}}} \sqrt{\frac{3V_T}{2S_\Omega D}}. \quad (7)$$

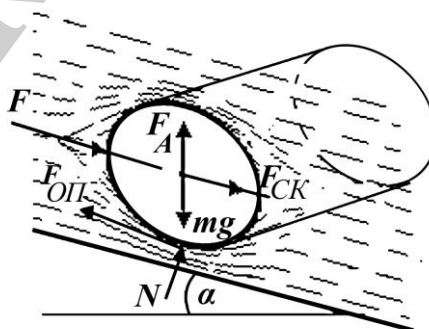


Рис. 3. Гранична рівновага каменя в низхідному потоці рідини:

F_A – виштовхувальна сила, $F_{ОП} = (\rho_K - \rho_B) V_T g \cos \alpha$ – сила опору, $F_{СК}$,
 N – скочуюча сила та нормальна реакція дна

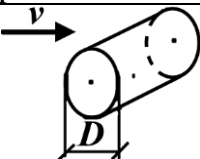
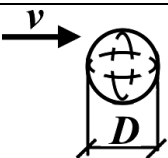
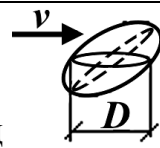
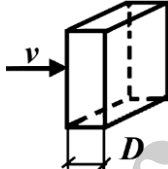
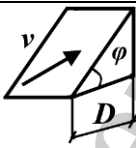

Вирази коефіцієнтів стиснення та обтічності для різних типів каменів, наведено в табл. 1. Зірочка у випадку еліпсоїдального каменя вказує на певні спрощення під час отримання наведеного відношення.

Із урахуванням (7), формулу (6) можна записати наступним чином

$$v = Y_C Y_{OBT} \sqrt{2g \frac{\rho_K - \rho_B}{\rho_B}} \sqrt{D}. \quad (8)$$

Таблиця 1

Коефіцієнти k_{CT} та Y_{OBT} для різних конфігурацій каменів

№	Конфігурація каменя	k_{CT}	Y_{OBT}
1	циліндр 	$3 - \frac{1,5}{\varepsilon}$	$\sqrt{\frac{3\pi}{8}} \frac{1}{\sqrt{3 - \frac{1,5}{\varepsilon}}}$
2	сфера 	$3 - \frac{2}{\varepsilon}$	$\frac{1}{\sqrt{3 - \frac{2}{\varepsilon}}}$
3	еліпсоїд 	$3 - \frac{2}{\varepsilon}$	$\frac{1}{\sqrt{3 - \frac{2}{\varepsilon}}}^*$
4	паралелепіпед 	3	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
5	клин 	$3 \left(1 - \frac{\cos \phi}{\varepsilon} \right)$	$\frac{0,5}{\sqrt{1 - \frac{\cos \phi}{\varepsilon}}}$
6	піраміда 	$3 \left(1 - \frac{\cos \phi}{\varepsilon} \right)$	$\frac{1}{\sqrt{6 \left(1 - \frac{\cos \phi}{\varepsilon} \right)}}$

Зазначимо, що коефіцієнт обтічності Y_{OBT} суттєво залежить як від конфігурації каменя, так і від коефіцієнта стиснення потоку. Зокрема для $Y_{OBT}=1$ формула (8) співпадає із відомою формулою Ізбаша [3]. Це можливо для сферичних та еліпсоїдальних каменів у разі знехтування стисненням струминок потоку ($\varepsilon=1$), а також для каменів інших типів, як це слідує з графічних залежностей запровадженого в роботі коефіцієнта обтічності Y_{OBT} від коефіцієнта стисливості потоку k_{CT} , поданих на рис. 4.

Представлені результати засвідчують суттєвий вплив конфігурації каменя на граничну швидкість потоку, яка спричиняє його кочення або зсув: чим більше значення коефіцієнта обтічності $Y_{\text{обт}}$, тим більша швидкість потоку потрібна для зрушення з місця каменя та є стійкішим такий камінь до дії водного потоку. Найвищими показниками обтічності характеризуються клиновидні камені, що є найефективнішими для берегоукріплень. Ненабагато меншими показниками обтічності характеризуються пірамідальні камені, які на даний час найчастіше використовуються у захисних накидах берегоукріплень річок. Каміні інших конфігурацій є значно скромнішими за показниками опірності до дії водного потоку.

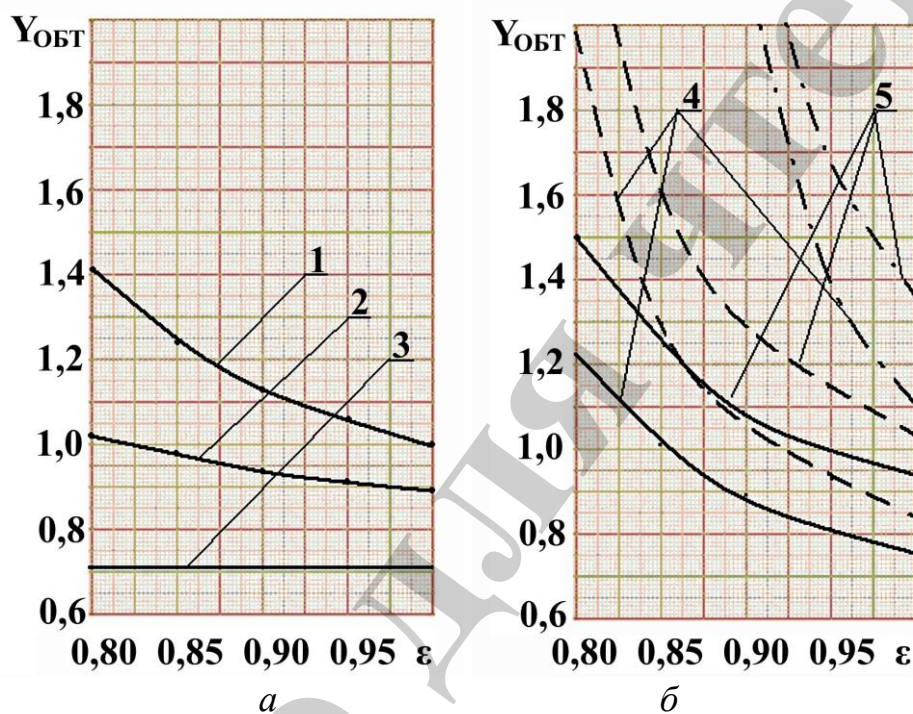


Рис. 4. Залежність коефіцієнта обтічності $Y_{\text{обт}}$ від коефіцієнта стиснення потоку ϵ : а – 1 – сферичний та еліпсоїдальний, 2 – циліндричний, 3 – паралелепіпедальний камені; б – 4 – пірамідальний та 5 – клиновидний камені; для графіків 4 та 5 суцільні лінії відповідають $\varnothing=45^\circ$, пунктирні – $\varnothing=40^\circ$, штрих-пунктирні – $\varnothing=30^\circ$

Отримані результати можна використовувати з метою порівняльного аналізу взаємодії річкових потоків із каменями різних конфігурацій. Для кількісного аналізу такої взаємодії необхідно виявити взаємозв'язок швидкості річкового потоку з масою окремого каменя.

Друге із завдань, поставлених у даній роботі, стосується розрахунків елементів захисту берегів річок та підтоплюваних опор інженерних споруд від катастрофічної дії повеней та паводків здійснюють влаштуванням кам'яних накидів. Мінімальний розмір каменя традиційно визначають із класичного розв'язку задачі для сферичного донного елементу приведенного діаметру $D_{\text{пр}}$ в річковому потоці, що рухається зі швидкістю v_0

$$v_0 = Y_C \sqrt{2g \frac{\rho_K - \rho_B}{\rho_B}} \sqrt{D_{\text{пр}}} \quad (9)$$

Із геометричних міркувань та відношення (9) маса каменю, що зрушується потоком річки

$$m = v_0^6 \frac{\pi \rho_K}{6} \left[\frac{1}{2g Y_C^2} \frac{\rho_B}{\rho_K - \rho_B} \right]^3 \quad (10)$$

В практиці формула (10) застосовується для розрахунку берегоукріплень банкетами з кам'яних накидів. Рекомендується у часткових випадках [1] для визначення приведеного діаметру каменів вибирати $Y_C=1,0$ для випадку незначного розміру елементу рельєфу дна у порівнянні із розміром каменю донних перешкод та $Y_C=1,5$ – для близьких розмірів. Під час розрахунку розмірів каміння, яким перегороджують русла річок, за умови, що такі камені на час виконання робіт не контактують із дном потоку, слід брати $Y_C=0,86-0,9$ [1]. Загальна ж картина залежності ваги окремих каменів від швидкості потоку в різних умовах взаємодії потоку із руслом представлена у вигляді графічних залежностей, поданих на рис. 5.

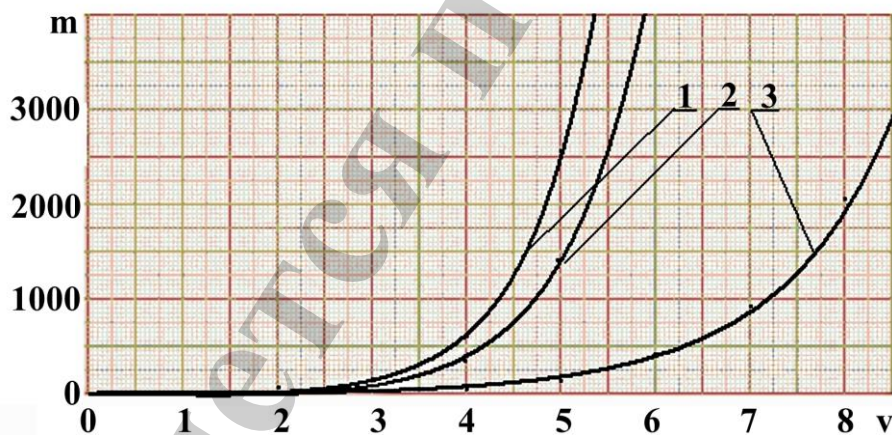


Рис. 5. Залежність маси m (кг) окремих каменів, що зрушуються після досягнення річковим потоком швидкості v (м/с): 1 – для $Y_C=0,9$; 2 – для $Y_C=1,0$; 3 – для $Y_C=1,5$

З метою визначення впливу конфігурації каменю на параметри його взаємодії із річковим потоком, запровадимо $K_{\text{ф}}$ – коефіцієнт форми каменя – відношення дійсної граничної швидкості потоку v для каменю довільної конфігурації (8) до граничної швидкості потоку $v_0^{\text{сф}} = v_0 \cdot Y_{\text{обт}}^{\text{сф}}$. Для сферичного каменю такої ж маси з приведеним діаметром та із врахуванням його обтічності, тут $Y_{\text{обт}}^{\text{сф}}$ – узагальнений коефіцієнт обтічності сферичного каменя з табл. 1

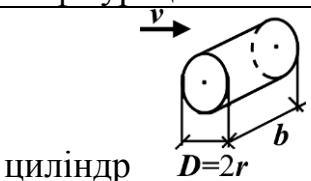
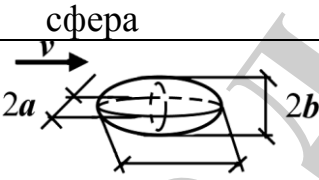
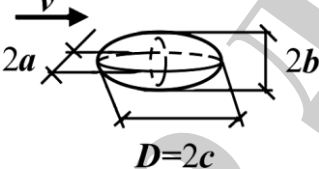
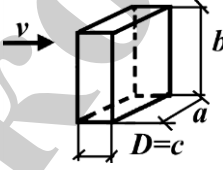
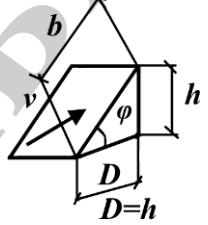
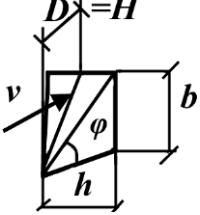
$$K_{\Phi} = \sqrt{3 - \frac{2}{\varepsilon} Y_{\text{ОБТ}}} \sqrt{\frac{D}{D_{\text{ПР}}}}. \quad (11)$$

Враховуючи, що $D_{\text{ПР}} = \sqrt[3]{\frac{6V_T}{\pi}}$, із (11) та табл. 1 визначено величини K_{Φ} – табл. 2. Для зрушення з місця каменю з коефіцієнтом форми $K_{\Phi} < 1$, необхідна менша швидкість потоку, аніж для сферичного каменю еквівалентної ваги і навпаки – для каменя з коефіцієнтом форми $K_{\Phi} > 1$. Підсумовуючи, запишемо вираз для швидкості потоку, яка зрушує камінь масою m_K заданої конфігурації

$$v = \sqrt[6]{m_K} \sqrt[6]{\frac{6}{\pi \rho_K} \frac{K_{\Phi} Y_C}{\sqrt{3 - \frac{2}{\varepsilon}}}} \sqrt{2g \frac{\rho_K - \rho_B}{\rho_B}}. \quad (12)$$

Таблиця 2

Значення коефіцієнта форми K_{Φ} для різних типів каменів

№	Конфігурація каменя	K_{Φ}
1	циліндр 	$\sqrt[6]{\frac{4r}{3b}} \sqrt{\frac{3\pi}{8} \frac{3\varepsilon - 2}{3\varepsilon - 1,5}}$
2	сфера 	1
3	еліпсоїд 	$\sqrt[6]{\frac{c^2}{ab}}$
4	паралелепіпед 	$\sqrt[6]{\frac{1}{6} \frac{c^2}{ab}} \frac{\sqrt{3 - \frac{2}{\varepsilon}}}{\sqrt{2}}$
5	КЛИН 	$\frac{\sqrt{3 - \frac{2}{\varepsilon}}}{\sqrt{1 - \frac{\cos \phi}{\varepsilon}}} \cdot 0,5 \cdot \sqrt[6]{\frac{\pi h}{3b \cdot \text{tg} \phi}}$
6	піраміда 	$\frac{\sqrt{3 - \frac{2}{\varepsilon}}}{\sqrt{1 - \frac{\cos \phi}{\varepsilon}}} \frac{1}{\sqrt[6]{6}} \sqrt[6]{\frac{\pi H}{2b \cdot \text{tg} \phi}}$

Із (12) визначаємо мінімальну для швидкості v масу каменя m_K

$$m_K = \frac{v^6}{(K_\Phi Y_C)^6} \frac{\pi \rho_K}{6} \left(\frac{3 - \frac{2}{\varepsilon}}{2g} \frac{\rho_B}{\rho_K - \rho_B} \right)^3. \quad (13)$$

Ця мінімальна маса m_K співвідноситься з масою неконфігурованого каменю m (10) наступним чином:

$$m_K = m_0 \cdot \frac{\left(3 - \frac{2}{\varepsilon}\right)^3}{(K_\Phi)^6}. \quad (14)$$

Відношення (14) разом із графічними даними рис. 5 слід використовувати для розрахунку мінімальної ваги конфігурованих каменів, коефіцієнт форми каменя K_Φ визначається за даними таблиці 2. Зокрема для каменів із найкращою обтічністю, як це впливає із рис. 4 – клиновидних, у випадку $\varepsilon = 1$, $\varphi = 30^\circ$ із таблиці 2 визначено $K_\Phi = 1,343$. Тоді із (14) обчислюється коригувальний коефіцієнт для визначення ваги клиновидного каменю у порівнянні до ваги сферичного каменю, а саме: $m_K = 0,170 \cdot m$. Використання каменів інших вибраних конфігурацій слід визначати за допомогою такої ж методики.

Рівняння (12) застосовується для визначення граничної швидкості потоку, яка може спричинити втрату стійкості конкретного наявного берегоукріплення.

6. Обговорення результатів та напрями подальших досліджень

Запроваджено використання коефіцієнта обтічності каменю, який дозволяє враховувати стиснення струменів річкового потоку під час визначення його граничної швидкості, що викликає зрушення каменю з місця. Коефіцієнт обтічності визначено для каменів, конфігурації яких є типовими для річкових потоків.

Запроваджено коефіцієнт форми, який дозволяє уточнювати вагу каменів, що зрушуються водним потоком, у залежності від конфігурації каменю та його обтічності. Використання запропонованого підходу передбачає уточнення маси окремих каменів, що використовуються для захисту від розмивів основ гідротехнічних споруд, оскільки в окремих випадках (клиновидні камені) коригувальний коефіцієнт може приймати значення 0,170, що дозволяє істотним чином економити ресурси, зменшуючи вагу окремих каменів у берегоукріпленнях.

Отримані формули, табличні дані, графіки та методика їх застосування є доступними для використання інженерно-технічними працівниками, водночас вони дозволяють охоплювати в розрахунках берегоукріплень обтічність використовуваних каменів та їх конфігуративні особливості.

Отримані в роботі результати дозволяють прогнозувати напрямки подальших досліджень. Рух річкового потоку викликає зрушення з місця донних елементів – каменів та спричиняє формування потоку із полідисперсної водно – каменевої суміші. Розміри окремих каменів у такому потоці є менші аніж граничні розміри, задані формулою (13). Швидкість окремих каменів в суміші залежить від швидкості потоку, розміру каменів та від додаткових імпульсів, отримуваних каменями від співударів між собою та елементами русла річки. Внаслідок інтенсивного руху річкового потоку частина каменів може отримати плавучість у висхідних турбулентних струменях потоку. Рух каменя у річковому потоці характеризується лінійним поздовжнім переміщенням і обертовим рухом навколо власного центру маси, зумовленого позацентровими співударами з іншими каменями.

У зв'язку із цим вбачається необхідним продовжувати дослідження наступним чином. По-перше, – визначити параметри ударної взаємодії рухомого каменя в потоці, розмір якого визначається за допомогою даного дослідження, з нерухомими елементами русла річки або захисних банкетних накидів підтоплених фундаментів інженерних споруд. Важливим є порівняльний аналіз результатів такої взаємодії з впливом на захисні елементи русла річкового потоку без каміння. По-друге, – визначити параметри руху річкового полідисперсного потоку водно-каменевої суміші із урахуванням розподілу швидкостей по периметру живого перерізу та впливом визначених даною роботою конфігурацій рухомих каменів на такий розподіл. Це могло б дозволити прогнозування процесу формування донних наносів.

7. Висновки

1. Визначено параметри граничної рівноваги конфігуративного донного елементу – каменя у водному потоці на основі циліндричного донного елемента, що може призводити до плавучості такого каменя. Запроваджено використання коефіцієнта обтічності та коефіцієнта форми каменя, які дозволяють уточнювати під час обчислень розміри каменів, стійких до дії річкового потоку. Значення запроваджених коефіцієнтів систематизовано у таблиці 1.

2. Розроблено методику уточненого розрахунку елементів берегоукріплень річок із врахуванням конфігурації використовуваних каменів, яка полягає у визначенні базових розмірів каменів згідно рисунку 5 з подальшим уточненням їх маси на підставі систематизованих к таблиці 2 коефіцієнтів форми каменя.

Література

1. Конструкції річкових укріпних споруд на гірських автомобільних дорогах України: Альбом. 89-2000. РУС. Державна служба автомобільних доріг: Наказ № 3 42 від 04.08.2002 р. Івано-Франківськ: Галдорпрогрес, 2002. 149 с.

2. Хлапчук В. В., Щодро О. Є. Дослідження місцевих розмивів біля річкових гідротехнічних споруд // Гідроенергетика України. 2014. № 2-3. С. 37–43.

3. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Высоконадежные конструкции противно фильтрационных покрытий каналов и водоемов, критерии их эффективности и надежности // Гидротехническое строительство. 2014. № 8. С. 18–25.
4. Горбань І. М. Чисельне моделювання еволюції нерівностей великого масштабу на річковому дні // Прикладна гідромеханіка. 2015. Т. 17, № 1. С. 21–36.
5. Yan R., Monaghan J. J. SPH simulation of skipping stones // European Journal of Mechanics – B/Fluids. 2017. Vol. 61. P. 61–71. doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2016.10.001>
6. Библиук Н. І., Ковальчук І. П., Мачуга О. С. Небезпечні стихійні явища в Карпатах: Причини виникнення та шляхи їх мінімізації // Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2008. Вип. 6. С. 105–119.
7. Budnikov A. A., Chaplina T. O., Pokazeev K. V. Motion of the Objects of Different Sizes and Shapes on the Surface of a Vortex // International Journal of Fluid Mechanics Research. 2016. Vol. 43, Issue 4. P. 368–374. doi: <https://doi.org/10.1615/interjfluidmechres.v43.i4.60>
8. Evaluation of a coupling interface for solving fluid–structure interaction problems / Garelli L., Schauer M., Rodriguez G. R., Langer S. C., Storti M. A. // European Journal of Mechanics – B/Fluids. 2016. Vol. 58. P. 117–126. doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2016.04.001>
9. Sharma P. K., Khandelwal M., Singh T. N. Variation on physico-mechanical properties of Kota stone under different watery environments // Building and Environment. 2007. Vol. 42, Issue 12. P. 4117–4123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.032>
10. Ткачук С. Г. Теоретична формула граничної глибини місцевого розмиву біля мостових опор в зв'язних ґрунтах // Гідравліка і гідротехніка. 2012. Вип. 66. С. 62–69.
11. Male elektrownie wodne: Niekonwencjonalne źródła energii / K. Kuczkowski et. al. URL: <https://docplayer.pl/3249811-Male-elektrownie-wodne.html>
12. Sedlák V., Ječný M. Deformation measurements on bulk dam of water-work in east Slovakia // Sbornik vedeckich prací Vysoké školy báňské. Technické Univerzity Ostrava: Řada hornicko-geologické. 2004. Vol. L, Issue 2. P. 1–10.
13. Критеріа pre dlhodobú prevádzku vodných diel horských riek / Machuga O., Byblyuk N., Byblyuk N., Machuga Y. // Mobile energy systems – Hydraulics – Environment – Ergonomics of mobile machines: Peer – review ed Proceedings. 2015. P. 79–87.